

AUSLEGUNG UND IMPLEMENTIERUNG EINES ZUVERLÄSSIGEN KOMMUNIKATIONSNETZES FÜR DEN SICHEREN BETRIEB UNBEMANNTER FLUGGERÄTE AUSSERHALB DER SICHTWEITE

N. Voget, F. Binz, Y. Dobrev, D. Moormann,
Institut für Flugsystemdynamik, RWTH Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

Innerhalb einer Forschungsflugkampagne im Winter 2015/2016 hat die RWTH Aachen im Auftrag der Deutsche Post DHL Flüge mit dem DHL Paketkopter 3.0 zwischen Reit im Winkl und der Winklmoosalm durchgeführt. Der Paketkopter wird seit 2013 in Forschungs- und Entwicklungsprojekten mit dem Ziel entwickelt, schwierig zu erreichende Regionen mit eiligen Gütern zu beliefern. Bei dem aktuellen Paketkopter handelt es sich um ein an der RWTH Aachen entwickeltes Tiltwing-Fluggerät mit einer Spannweite von 2 m und einer maximalen Abflugmasse von 14 kg. Für den Flugbetrieb zwischen Reit im Winkl und der Winklmoosalm wurden zwei Packstationen als Start- und Landeplatz aufgebaut. Die Flugdistanz zwischen Reit im Winkl und der Winklmoosalm beträgt etwa 8 km bei einer Höhendifferenz von über 500 m. Aufgrund der lokalen Topographie befand sich das Fluggerät während des Flugs meist außerhalb der Sichtweite des Steuerers. Alle Flüge erfolgten vollautomatisch.

Dieser Beitrag beschreibt die Umsetzung der Anforderungen an ein sicheres Kommunikationssystem für diese Flugkampagne. Ein zuverlässiges Kommunikationssystem ist unerlässlich für Flüge außerhalb der Sichtweite des Steuerers, da in diesem Fall keine unabhängige Beurteilung der Situation möglich ist, sondern der Steuerer auf Daten, die vom Fluggerät übermittelt werden, angewiesen ist. Wegen des schwachen Mobilfunkempfangs in der Bergregion um Reit im Winkl wird die Kommunikation redundant über Mobilfunk und einen proprietären seriellen Funk mit hoher Reichweite hergestellt. Da das UAV während des Flugs von Bergen abgeschattet wird, werden mehrere Funkstationen benötigt, um einen stetigen Funkkontakt zum Fluggerät aufrechterhalten zu können. Die sich stetig verändernde Sichtbarkeit des Fluggeräts zu den einzelnen Funkstationen erfordert zudem eine dynamische Aktualisierung der Routen zwischen den Kommunikationspartnern. Um zudem die Sichtbarkeit des Fluggeräts für andere Teilnehmer im Luftraum zu verbessern, wird zusätzlich ein ADS-B-Transponder eingesetzt. Aufgrund der starken Abschattung des Fluggeräts durch das umliegende Gelände wird dieser von einer festen Position aus betrieben und sendet während des Flugs die vom Fluggerät übermittelten Informationen z. B. zu Position und Geschwindigkeit. Die während der Flüge gewonnenen Erkenntnisse zur implementierten Kommunikationsinfrastruktur werden in diesem Beitrag vorgestellt.

1. EINLEITUNG

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Paketkopter 3.0“ der Deutschen Post DHL wurden Anfang 2016 Pakete von einem vollautomatisierten unbemannten Fluggerät zwischen Reit im Winkl und der Winklmoosalm in den bayerischen Alpen transportiert. Hierzu wurde vom Institut für Flugsystemdynamik der RWTH Aachen (FSD) der Paketkopter in Kippflügelkonfiguration entwickelt. Dieser kann durch Kippen des Tragflügels senkrecht starten und landen. Nach dem Übergang aus der Schwebekonfiguration in die Flächenflugkonfiguration können große Strecken effizienter zurückgelegt werden als mit einem typischen Multikopter. Damit kann zwischen Reit im Winkl und der Winklmoosalm eine Strecke von über 8 km bei einem Höhenunterschied von mehr als 500 m zurückgelegt werden. Um eine vollständige Integration des Paketkopters in den Logistikprozess zu schaffen, wurden von der Polygon GmbH zwei für das Szenario modifizierte Packstationen, sogenannte SkyPorts, entwickelt. Diese besitzen einen Aufbau, der als Start- und Landeplattform des Paketkopters dient. Zusätzlich ist der Paketkopter so konstruiert worden, dass er vollautomatisch durch den SkyPort be- und entladen werden kann.

Aufgrund der Entfernung zwischen den beiden SkyPorts musste das Fluggerät außerhalb der Sichtweite des Luftfahrzeugführers betrieben werden. Das FSD und die DHL verfügen diesbezüglich bereits über Erfahrungen, die im vorangegangenen Forschungsvorhaben gewonnen wurden. Bei diesem wurden Ende des Jahres 2014 eilige

Medikamente von Norddeich über eine Strecke von mehr als 12 km auf die Nordseeinsel Juist transportiert [1]. Dabei mussten sowohl die Medikamente als auch die Akkus manuell in das Fluggerät eingesetzt und wieder aus diesem entnommen werden. Im aktuellen Szenario sollte hingegen die Prozesskette so automatisiert werden, dass nach dem Einlegen eines Pakets in die Startpackstation durch den Kunden bis zur Entnahme des Pakets aus der Zielpackstation durch den Empfänger keine direkte menschliche Interaktion mit dem Paket oder Fluggerät nötig ist.

Für den Betrieb eines unbemannten Fluggeräts außerhalb der Sichtweite des Luftfahrzeugführers benötigt dieser einen Kommunikationskanal, über den er Statusdaten vom Fluggerät bereitgestellt bekommt und seinerseits Kommandos an das Fluggerät übermitteln kann. Da dieser Kommunikationskanal die einzige Schnittstelle zwischen Fluggerät und Luftfahrzeugführer darstellt, ergeben sich aus dem Betrieb des Paketkopters über bewohntem Gebiet hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit dieses Kommunikationskanals. Zusätzlich soll der Paketkopter so in den Luftraum integriert werden, dass andere Luftraumteilnehmer diesen wahrnehmen können.

Im Folgenden wird die Entwicklung des Kommunikationssystems für das vorliegende Szenario vorgestellt. Dazu werden zuerst die Anforderungen an das Kommunikationssystem aufgezeigt. Darauf aufbauend wird das Konzept der Infrastruktur und die Implementierung der zugehörigen Softwarekomponenten

präsentiert. Abschließend folgt eine kurze Darstellung der im Flugbetrieb gewonnenen Erkenntnisse.

2. ANFORDERUNGEN

Die Anforderungen an das zu entwickelnde Kommunikationssystem können in zwei Bereiche aufgeteilt werden. Ein Bereich besteht aus den Datenströmen, die vom Kommunikationssystem übertragen werden sollen, sowie den zugehörigen Kommunikationspartnern. Der andere Bereich umfasst die räumlichen und topographischen Begebenheiten im Einsatzgebiet und die dort bereits vorhandene Infrastruktur.

2.1. Kommunikationsströme

Die für die Flugsicherheit relevante Kommunikation spielt sich zwischen Fluggerät und Luftfahrzeugführer ab, der den Flug aus einer mobilen Bodenstation (MBS) heraus überwacht und bei Bedarf eingreifen kann. Die MBS besteht im vorliegenden Fall aus zwei PC-Arbeitsplätzen mit je vier Bildschirmen, die in ein Fahrzeug verbaut sind. Damit auch die Prozesse der SkyPorts aus der MBS gesteuert werden konnten, wurde diese in unmittelbarer Nähe des SkyPorts in Reit im Winkl stationiert und an dessen Computernetzwerk und Stromnetz angeschlossen.

Da der Luftfahrzeugführer jederzeit in der Lage sein muss, den aktuellen Zustand des Fluggeräts zu beurteilen und eine Abweichung vom geplanten Ablauf zu erkennen, sendet das Fluggerät kontinuierlich aktuelle Statusdaten an die Bodenstation. Zu diesen Daten gehören unter anderem die Positionskoordinaten und Orientierungswinkel sowie die Spannung der elektrischen Versorgung. Die Daten werden für die Übertragung in verschiedene Pakete aufgeteilt, deren Frequenzen unterschiedlich eingestellt werden können, sodass Daten mit höherer Dynamik öfter übertragen werden können als Daten, die sich seltener verändern. Die Frequenz kann dabei zwischen 1 Hz und 100 Hz in mehreren Stufen gewählt werden.

Der Luftfahrzeugführer kann das Verhalten des Fluggeräts beeinflussen, indem dieser Parameterwerte an das Fluggerät sendet. Dies umfasst Parameter für die Angabe des Start- und Zielpunktes, anhand derer im Regler die zugehörige Route ausgewählt wird, sowie Parameter, mit dem in die Flugführung eingegriffen werden kann.

Für die hochpräzise Positionsregelung während der Start- und Landephase verfügt das Fluggerät statt eines herkömmlichen GPS-Empfängers über ein Real-Time-Kinematics-Modul (RTK). Damit wird eine Positionsgenauigkeit mit einer Standardabweichung unter 3 cm erreicht. Dazu benötigt das Modul zusätzliche Daten von einem zweiten Modul, das sich an einer hochgenau vermessenen, festen Position befindet [2]. Die von dieser Basisstation bereitgestellten Daten werden in zwei getrennten Paketen übermittelt, je ein Paket zur verbesserten Auswertung der GPS- und der GLONASS-Daten. Beide Pakete werden einmal pro Sekunde aktualisiert, wobei eine hochgenaue Positionsbestimmung auch noch bei gelegentlichen Ausfällen der Stützdaten von bis zu vier Sekunden möglich ist.

Viele bemannte Fluggeräte verfügen über technische Hilfsmittel, die den Piloten bei der Wahrnehmung anderer Luftraumteilnehmer unterstützen. Zwar beträgt die Flughöhe des Paketkopters bis auf ein kurzes Segment

weniger als 100 m Abstand zum Boden, wodurch der Flieger unter dem ab 500 ft über Grund für die allgemeine Luftfahrt freigegebenen Luftraum bleibt. Allerdings sind insbesondere während des Skibetriebs in den Wintermonaten in der Alpenregion um Reit im Winkl täglich Rettungshubschrauber im Einsatz. Diese sind oftmals mit PowerFLARM ausgerüstet, sodass sich zur Verbreitung der Paketkopter-Position ein FLARM- oder ein ADS-B-Modul anbietet. Aufgrund der Topographie wäre eine Ausbreitung der Signale bei einem fliegergebundenen Modul stark eingeschränkt, deswegen wurde der Transponder fest außerhalb des Fluggeräts so positioniert, dass ein Empfang der Signale im gesamten Fluggebiet des Paketkopters ermöglicht wird. Durch diese externe Positionierung muss das Fluggerät regelmäßig dem Transponder die benötigten Informationen übermitteln.

Datenstrom	Datenrate
Flugzeugstatus	350 – 3500 B/s
Steuerkommandos	< 20 B/s
RTK-Stützdaten	400 B/s
ADS-B	20 B/s

TAB 1. Auflistung der Datenströme

TAB 1 fasst die auftretenden Datenströme sowie deren erwarteten Datenraten zusammen. Der große Datenratenbereich für die Flugzeugstatusdaten ergibt sich dabei aus den Fällen, wenn alle Datenpakete einerseits mit 1 Hz und andererseits bestimmte Datenpakete mit höheren Frequenzen bis zu 100 Hz gesendet werden. Da allerdings auch bei einer Bereitstellung aller Statusdaten mit 1 Hz eine ausreichende Beurteilung der Situation ermöglicht wird, ergibt sich insgesamt ein Mindestdatenratenbedarf von etwa 400 Byte/s vom Fluggerät zu verschiedenen Empfängern sowie ebenfalls ungefähr 400 Byte/s von der Bodenstation und der RTK-Basisstation zum Fluggerät.

2.2. Szenariospezifische Randbedingungen

Die Auswahl einer geeigneten Technik für den Austausch der Daten zwischen den bodengebundenen Kommunikationsteilnehmern und dem Fluggerät hängt stark von der erzielbaren Reichweite ab. Unter Berücksichtigung der zu überbrückenden Distanz von 8 km fallen viele bei kleinen unbemannten Luftfahrzeugen verwendete Datenlinkmodule aus der Betrachtung, da beispielsweise die im 2,4-GHz-Band operierenden Techniken WLAN und xBee Reichweiten unter 1 km besitzen.

Ein weiteres Problem bei der Auslegung der Kommunikationsinfrastruktur ergibt sich durch die Topographie des Einsatzgebiets, da sämtliche drahtlosen Übertragungsverfahren auf eine direkte Sichtverbindung der Kommunikationsteilnehmer angewiesen sind. In BILD 1 ist jedoch zu erkennen, dass das Fluggerät aus Sicht des SkyPorts in Reit im Winkl kurz nach der ersten Linkskurve vom nördlich liegenden Berg abgeschattet wird, sodass eine direkte Kommunikation zwischen der in Reit im Winkl befindlichen Bodenstation und dem Fluggerät für den Großteil der Strecke nicht möglich ist.

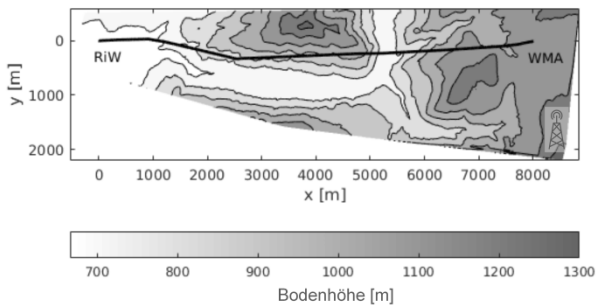


BILD 1. SkyPorts, Route und Relaisstation (Geobasisdaten © Bayerische Vermessungsverwaltung)

Eine Anpassung der Trajektorie im Sinne besserer Sichtbarkeit ist dabei aufgrund behördlicher Rahmenbedingungen nicht möglich [3]. Ebenso wird die Sicht des SkyPorts der Winklmoosalm auf den Großteil der Strecke vom westlich des SkyPorts gelegenen Berg verdeckt, sodass während eines langen Streckenabschnitts keine direkte Kommunikation vom Fluggerät zu einem der beiden SkyPorts möglich ist. Diese Gegebenheiten verhindern damit sowohl eine einfache Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen Flieger und einer festen Empfangsstation am Boden als auch einen Aufbau ähnlich dem des vorangegangenen Szenarios, bei dem durch Kommunikationsmodule auf beiden Seiten der Strecke eine durchgehende Kommunikation zum Fluggerät sichergestellt werden konnte [1].

3. REALISIERUNG

Die Realisierung des Kommunikationsnetzes erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird eine Infrastruktur geschaffen, über die den Kommunikationspartnern der Austausch von Nachrichten ermöglicht wird. Darauf aufbauend werden die benötigten Softwarekomponenten implementiert, um den verschiedenen Anwendungsprogrammen die Nutzung der Infrastruktur zu ermöglichen.

3.1. Infrastrukturkonzept

Eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen Paketkopter und Bodenstation ist aufgrund der topographischen Gegebenheiten über einen langen Zeitraum des Flugs nicht möglich. Um dennoch eine eigenständige Funkverbindung zum Fluggerät während des kompletten Flugs aufrechterhalten zu können, wurde zusätzlich eine Relaisstation so platziert, dass der Paketkopter an jedem Punkt der Strecke eine direkte Verbindung zu einem der SkyPorts oder der Relaisstation besitzt. Zudem musste die Position der Relaisstation eine direkte Verbindung dieser Station zu beiden SkyPorts ermöglichen. Neben diesen geographischen Einschränkungen musste bei der Platzierung der Relaisstation zudem darauf geachtet werden, dass eine Anschlussmöglichkeit an das Stromnetz besteht, da die Relaisstation über den Zeitraum der Flugkampagne ununterbrochen betrieben werden sollte. Aufgrund dieser Randbedingungen wurde die Bergstation der Roßalmbahn gewählt, die sich 2 km südlich des SkyPorts auf der Winklmoosalm befindet. Die maximale Entfernung des Paketkopters zur Relaisstation ergibt sich damit zu etwa 9 km, wenn sich der Paketkopter am SkyPort in Reit im Winkl befindet.

Unter Berücksichtigung der geforderten Reichweite und Datenrate des Funkkanals wird auf LoRa-Module der Firma IMST zurückgegriffen, die bereits beim

vorangegangenen Szenario erfolgreich bei einer Distanz von 12 km eingesetzt wurden [1]. Diese Module bieten eine Übertragungsrate von 1 kB/s, wobei beachtet werden muss, dass immer nur ein Modul zur selben Zeit senden kann und daher insbesondere kein Voll duplexmodus möglich ist.

Mit Paketkopter, beiden SkyPorts und Relaisstation gibt es vier LoRa-Kommunikationsknoten, die jeweils senden und empfangen können. Um Kollisionen zum gleichen Zeitpunkt von verschiedenen Teilnehmern gesendeter Nachrichten zu verhindern, muss sichergestellt werden, dass immer nur ein Teilnehmer gleichzeitig senden darf. Dazu wird ein Master/Slave-Ansatz gewählt, bei dem ein Teilnehmer als Verwalter des Kommunikationskanals den anderen Teilnehmern fortlaufend Sendeberechtigungen erteilt. Zwar ergibt sich im vorliegenden Fall das Problem, dass keiner der Teilnehmer zu jedem Zeitpunkt mit allen anderen Teilnehmern direkt kommunizieren kann, allerdings stellt das Fluggerät immer eine Seite der Kommunikation dar, sodass Kommunikationspartner, die nicht mit dem Fluggerät kommunizieren können, keinen Nachteil erfahren, wenn sie keine Sendeberechtigung erhalten. Aus diesem Grund bietet es sich an, dem Fluggerät die Verwaltung des Funkkanals zu überlassen.

Dieser Ansatz führt allerdings zu dem Problem, dass Kommunikationsteilnehmer an Zeitpunkten, zu denen sie über keine direkte Verbindung zum Fluggerät verfügen, ihre Daten auch nicht an eine andere bodengebundene Station schicken können, damit diese die Daten an das Fluggerät weiterleiten kann. Um unabhängig von der aktuellen Erreichbarkeit des Fluggeräts durch die einzelnen Knoten eine Kommunikation zwischen den bodengebundenen Teilnehmern zu ermöglichen, wird daher ein zweiter LoRa-Kanal eingesetzt, auf dem die Kommunikationseinheiten der beiden SkyPorts und der Relaisstation mit einem jeweils zweiten LoRa-Modul miteinander kommunizieren können. Die Zugriffsverwaltung dieses Kanals übernimmt die Relaisstation, da diese in direkter Verbindung mit beiden SkyPorts steht. BILD 2 zeigt schematisch die Verbindung der einzelnen Kommunikationspartner über die beiden LoRa-Kanäle.

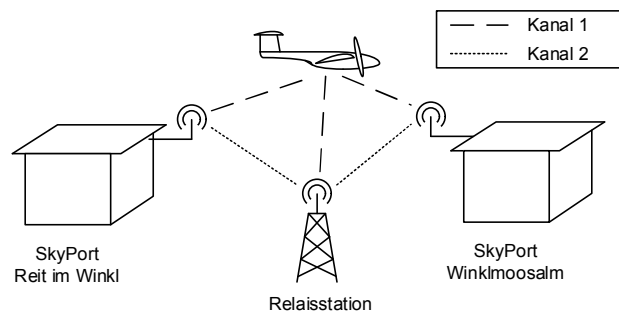


BILD 2. Verbindung der Kommunikationspartner über LoRa-Funkkanäle

Obwohl die LoRa-Module im vorherigen Szenario ohne Ausfälle verwendet werden konnten, wird zur Erhöhung der Ausfallsicherheit des Datenlinks zusätzlich das Mobilfunknetz der Deutschen Telekom benutzt. Dafür wurden alle Kommunikationsknoten mit dem Mobilfunkmodul EM7305 von Sierra Wireless ausgerüstet, das über USB angesteuert werden kann.

Im Mobilfunknetz erhält der Teilnehmer bei jeder Einbuchung eine wechselnde IP-Adresse, sodass der Teilnehmer von außen nicht über eine feste Adresse angesprochen werden kann. Aus diesem Grund wurde am FSD ein VPN-Server aufgesetzt, mit dem sich die einzelnen Kommunikationsteilnehmer verbinden, wodurch diesen eine VPN-interne, feste IP zugewiesen werden kann.

Die über Mobilfunk erreichbare Datenrate und Latenz ist stark von der Position des Teilnehmers abhängig. Im Gebiet um Reit im Winkl ist die verwendbare Übertragungstechnik auf weiten Teilen der Strecke auf EDGE bei geringer Empfangsstärke begrenzt, wodurch nur geringe Datenraten im Bereich weniger Kilobyte pro Sekunde bei Latenzen im Bereich einer Sekunde erzielt werden können.

Für die Verbreitung der Flugzeugposition und weiterer Informationen an andere Luftraumteilnehmer wird der ADS-B-Transponder VT-01 von Garrecht Avionik verwendet. Dieses Modul erwartet über eine serielle Schnittstelle den aktuellen Zeitpunkt, die Flugzeugposition in Länge, Breite und Höhe sowie den Betrag und die Richtung der Geschwindigkeit. Um eine möglichst ungestörte Ausbreitung der Transpondersignale zu erreichen, wird dieser neben der Relaisstation platziert und über diese an das Kommunikationsnetz angebunden.

3.2. Implementierung

Die für das vorliegende Szenario speziell geschaffene Infrastruktur zwischen dem Paketkopter und den bodengebundenen Kommunikationseinheiten erfordert eine an die Gegebenheiten angepasste Software, um eine zuverlässige Datenübertragung zu ermöglichen. Durch die Software soll eine transparente Schnittstelle geschaffen werden, mit der die an der Kommunikation beteiligten Anwendungsprogramme miteinander kommunizieren können, ohne dass in diesen Programmen eigene Verfahren zur Erzielung von Redundanz und Verlässlichkeit implementiert werden müssen.

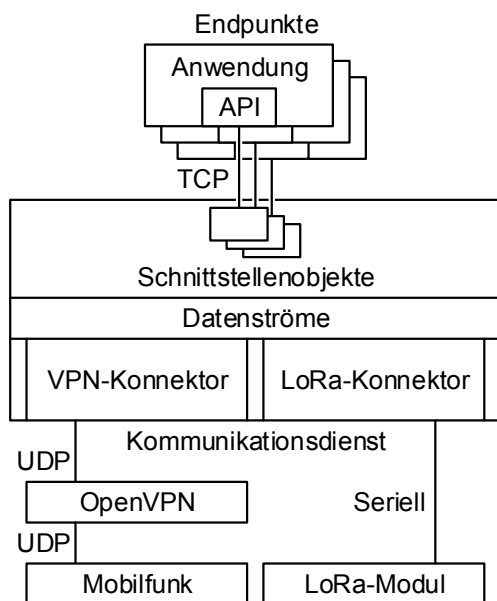


BILD 3. Struktur der Kommunikationssoftware

Angelehnt an das ISO/OSI-Modell [4] wurde dabei ein schichtenbasierter Aufbau der Kommunikationssoftware gewählt, der schematisch in BILD 3 dargestellt ist.

In diesem Aufbau stellen die Anwendungsprogramme, die miteinander über verschiedene Datenströme kommunizieren, die Endpunkte dar. Jeder Endpunkt ist mit dem Kommunikationsdienst desselben Knotens über ein eigenes Schnittstellenobjekt verbunden. Über den Kommunikationsdienst kann der Endpunkt Datenströme zu Endpunkten sowohl auf demselben als auch auf anderen Knoten aufbauen. Anschließend können die Endpunkte über die so erzeugten Datenströme Daten senden und empfangen. Die Kommunikation zwischen einem Endpunkt und seinem zugehörigen Schnittstellenobjekt innerhalb des Kommunikationsdienstes findet über eine TCP-Verbindung statt. Zur einfachen Nutzung dieser Schnittstelle innerhalb der Anwendungsprogramme wurde eine Bibliothek implementiert, in der die Umwandlung der vorgenannten Funktionalitäten in entsprechende TCP-Segmente übernommen wird. Das Schnittstellenobjekt wandelt entsprechend die eintreffenden Segmente in Funktionsaufrufe innerhalb des Dienstprogramms um. Ebenso werden Antworten an den Endpunkt in zugehörige Segmente konvertiert und über die TCP-Verbindung an diesen geschickt.

Der Kommunikationsdienst stellt den Anwendungsprogrammen sowohl verlässliche als auch nicht-verlässliche Datenströme zur Verfügung, deren Eigenschaften denen von TCP und UDP ähneln. Beim verlässlichen Datenstrom wird sichergestellt, dass alle vom Anwendungsprogramm gesendeten Daten garantiert und in derselben Reihenfolge beim Empfänger eintreffen. Dazu werden die Daten durchnummeriert und jeder Empfang eines Datenpakets, das nahtlos an die zuletzt empfangenen Daten anschließt, vom Empfänger quittiert. Trifft beim Sender innerhalb einer festen Zeitspanne keine Empfangsbestätigung ein, sendet dieser das Paket erneut.

Der nicht-zuverlässige Datenstrom hingegen verwirft zu sendende Daten, sobald diese an die tiefer liegende Übertragungsschicht weitergereicht wurden. Da hierdurch Daten auf dem Weg zum Empfänger verloren gehen können, muss jedes übermittelte Paket eine in sich geschlossen verwendbare Einheit darstellen. Um zu verhindern, dass beim Empfänger ein Paket aufgrund längerer Übertragungsdauer nach einem bereits eingetroffenen neueren Paket verarbeitet wird, werden die Pakete mit einem Zähler versehen.

Die Auswahl der passenden Übertragungsart hängt von den Eigenschaften der zu übertragenden Daten ab. So muss für Parameterpakete eine zuverlässige Übertragung gewählt werden, für Statusdaten des Fluggeräts hingegen wird eine nicht-zuverlässige Übertragung verwendet, da statt einer erneuten Übertragung eines verloren gegangenen Pakets besser ein Paket mit aktuellen Daten gesendet wird.

Im Hinblick auf hohe Ausfallsicherheit wurde entschieden, sämtliche Daten parallel über alle verfügbaren Datenkanäle zu schicken. Die damit einhergehende Reduktion der nutzbaren Datenrate wurde dabei bewusst in Kauf genommen, weil beide Kommunikationskanäle jeweils eine Datenrate zur Verfügung stellen, die über der für den sicheren Betrieb des Fluggeräts benötigten Datenrate liegt. Außerdem würde ein für eine sinnvolle

Aufteilung der Pakete auf die beiden Kanäle benötigter Algorithmus wegen der stark ungleichen Eigenschaften der Kanäle zu einer hohen Komplexität und damit zu negativen Auswirkungen auf die Ausfallsicherheit führen.

Die Verwendung der Mobilfunkschnittstelle zur Datenübertragung kann unkompliziert implementiert werden, indem sämtliche Datenpakete als UDP-Datagramme über die auf die Mobilfunkschnittstelle aufbauende VPN-Verbindung an die bekannte VPN-Adresse des Zielknotens gesendet werden.

Die Nutzung der LoRa-Funkstrecke gestaltet sich softwareseitig deutlich komplexer. Die veränderliche gegenseitige Sichtbarkeit der LoRa-Module führt dazu, dass die Kommunikationspartner fortlaufend bestimmen müssen, über welchen Knoten Nachrichten an einen bestimmten Zielknoten geleitet werden können. Bei direktem Sichtkontakt zum Zielknoten kann die Nachricht unmittelbar an diesen zugestellt werden, ansonsten muss diese an einen direkt erreichbaren Knoten weitergegeben werden, der seinerseits den Zielknoten erreichen kann, eventuell wiederum nur über weitere Zwischenknoten. Um diese Routen dynamisch aufbauen zu können, schickt jeder Knoten bei jedem Sendevorgang den zu den verschiedenen Zielknoten jeweils gewählten direkt benachbarten Zwischenknoten mit.

Aufgrund der Zuteilung des Funkkanals im Master/Slave-Modus können von Datenströmen erzeugte Datenpakete nicht direkt an den entsprechenden Zwischenknoten übermittelt werden. Stattdessen muss der Knoten auf eine Sendeberechtigung warten. Dazu verteilt der Master des Funkkanals die Berechtigung reihum an die verschiedenen Slaves, sodass abwechselnd der Master und ein berechtigter Slave senden dürfen. Der Slave muss dazu unmittelbar nach Empfang der Berechtigung genau eine Nachricht senden. Liegen dem Slave keine zu übermittelnden Daten vor, sendet dieser eine leere Nachricht, um den Kanal wieder an den Master abzugeben. Damit der Master auch senden kann, wenn der freigegebene Slave die Berechtigung nicht empfangen hat oder die Antwortnachricht des Slaves nicht beim Master ankam, sendet der Master spätestens nach Ablauf einer festen Frist, die etwas länger als die längstmögliche Übertragungszeit einer Antwortnachricht ist.

In der Zeitspanne zwischen zwei Sendeberechtigungen eines Knotens können mehrere Pakete eines nicht-zuverlässigen Datenstroms erzeugt werden. Aufgrund der begrenzten Datenrate soll allerdings jeweils nur das aktuellste bisher nicht von der LoRa-Schnittstelle verarbeitete Datenpaket gesendet werden. Daher werden bei Vorliegen der Sendeberechtigung alle Datenströme nach zu übermittelnden Paketen abgefragt, statt die Pakete in einem gemeinsamen Puffer zu speichern. Die Abfrage erfolgt dabei nach Priorität der Datenströme sortiert, sodass aufgrund der maximalen Größe einer LoRa-Nachricht von 243 Bytes Datenströme mit niedrigerer Priorität unter Umständen nicht berücksichtigt werden können. Die Priorität eines Datenstroms berechnet sich daher aus einer für den Datenstrom angegebenen Grundpriorität und der Zeit, die seit der letzten Übertragung von Daten dieses Datenstroms vergangen ist, sodass auch von Datenströmen mit einer niedrigen Grundpriorität regelmäßig Daten gesendet werden.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag wurde die Konzeptionierung und Umsetzung eines Kommunikationsnetzes für den sicheren Betrieb unbemannter Flugsysteme außerhalb der Sichtweite präsentiert. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Ausfallsicherheit dieses Kommunikationssystems, da dieses die einzige Verbindung zwischen dem Luftfahrzeug und seinem verantwortlichen Führer darstellt. Dazu wurden zunächst die Anforderungen an das System herausgearbeitet, die sich generell aus dem Betrieb unbemannter Systeme außerhalb der Sichtweite ergeben. Anschließend wurden die zusätzlichen Randbedingungen betrachtet, die durch den Betrieb in der Alpenregion zwischen Reit im Winkl und der Winklmoosalm auftreten.

Aufgrund der topographischen Gegebenheiten wurde zusätzlich zu den Funkstationen an beiden Start- und Landeplätzen eine Relaisfunkstation an einem höher gelegenen Standort errichtet, um über die komplette Strecke ununterbrochenen Funkkontakt zum Fluggerät aufrechterhalten zu können. Als Funkmodul wurden aufgrund der hohen Entfernung LoRa-Module der Firma IMST verwendet. Um bei der Übertragung der für die Flugdurchführung kritischen Flugzeugstatusdaten nicht von einer einzigen Funkstrecke abhängig zu sein, wurde zusätzlich das Mobilfunknetz verwendet.

Anschließend wurden die Softwarekomponenten skizziert, die unter Nutzung der geschaffenen Infrastruktur den Anwendungsprogrammen eine zuverlässige Kommunikation garantieren. Besondere Betrachtung fand dabei die Anbindung der LoRa-Funkkanäle.

Das so entwickelte Kommunikationsnetz wurde Anfang 2016 erfolgreich im Rahmen der Forschungsflüge zwischen Reit im Winkl und der Winklmoosalm eingesetzt. Aufgrund des modularen Softwareaufbaus lassen sich große Teile der Systemkomponenten auch in anderen Szenarien und mit anderen Übertragungstechniken nutzen. Einzig die stark auf die betrachtete Mission zugeschnittene Struktur der LoRa-Funkkanäle müsste für einen veränderten Anwendungsfall entsprechend neu ausgelegt werden.

LITERATUR

- [1] C. Ben, N. Voget und D. Moormann, „Konzeption und Evaluierung einer Kommunikationsinfrastruktur für Beyond-Line-Of-Sight Flugversuche von unbemannten Fluggeräten,“ Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Rostock, 2015.
- [2] Y. Dobrev, M. Schütt, P. Hartmann und D. Moormann, „Entwurf und Validierung eines Präzisionslandesystems für unbemannte Tiltwingfluggeräte,“ Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Braunschweig, 2016.
- [3] J. Holsten, P. Hartmann, M. Schütt und D. Moormann, „Automatische unbemannte Flüge außerhalb der Sichtweite zwischen zwei Packstationen mit einem Tiltwingfluggerät,“ Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Braunschweig, 2016.
- [4] International Telecommunication Union, „Information Technology - Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model,“ 1994.